

# 인공생명과 지능시스템

조 성 배

연세대학교 컴퓨터과학과

서울 서대문구 신촌동 134번지

E-mail: sbcho@csai.yonsei.ac.kr

## Artificial Life and Intelligent System

Sung-Bae Cho

Dept. of Computer Science, Yonsei University

134 Shinchon-dong, Sudaemoon-ku, Seoul, Korea

Tel: 02-361-2720 Fax: 02-365-2579

### 요 약

최근에 인공생명이나 진화적 계산론이라는 이름의 새로운 지능정보처리 방식이 미국과 일본의 중심으로 활발히 연구되고 있다. 이것은 지금까지 개별적으로 제안된 두뇌의 가소성이나 개체의 발생, 적응과 진화 등 생물의 특성으로부터 파생된 모형들을 총동원하여 정보처리의 새로운 가능성을 모색하고자 하는 것이다. 본 논문에서는 인공생명의 연구가 어떻게 시작되었으며, 현재의 기술수준이 어느 정도인지에 대하여 소개하고자 한다. 아울러, 인공생명으로부터 가능한 새로운 형태의 정보처리 기능창출을 목표로 하는 연구동향을 살펴보고 앞으로의 방향을 전망해 본다.

### I. 서론

명령에 복종하는 인공물의 창조는 인간이 오랫동안 꿈꾸어 온 것이다. 이와 관련된 극단적인 이야기가 소설이나 영화의 형태로 소개되어 왔는데, 그중 널리 알려진 것으로는 프랑켄슈타인이나 터미네이터 등을 들 수 있다. 최근에는 유라기 공룡이라는 소설에서는 수천만년 동안 보존된 공룡의 유전자 코드로부터 재생된 공룡을 다름으로써 한동안 커다란 화제를 모으기도 하였다. 이 모든 이야기는 공상과학 소설에 불과하고 현실은 이와 비교할 수 없을 정도의 초보적인 수준이지만, 최근 거론되고 있는 인공생명(Artificial Life)의 궁극적인 가능성을 보여주고 있다.

실제로 인공생명의 궁극적인 목표는 한마디로 말해서 “생명이란 무엇인가?”에 대한 답을 찾는 것이라 할 수 있다. 기존에 생물학에서 생명을 연구하는 분석적인 접근방식에서 탈피하여 생명이라고 불릴 수 있는 어떤 것을 구축하는 합성적인 접근방식을 취하는 것이 가장 커다란 차이점이다. 하지만, 이 논문에서는 인공생명의 이러한 목적에 대한 철학적인 의미는 차치하고 공학적인 응용이라는 관점에서 어디까지 진전되어 있으며 어떤 방향으로 나아가고 있는지 소개하고자 한다.

이를 위해서 우선 동물의 행동을 흉내내는 시스템을 구축하고자 했던 초기의 작업을 소개하기로 한다. 이러한 작업은 오토마톤(automaton)이라는 개념을 시작으로 오늘날의 컴퓨터 기술을 가능하도록 한 밑바탕이 되었다. 이렇게 가능하게 된 컴퓨터는 다시 인공생명 모델을 가능하도록 하였는데, 이 과정은 다시 새로운 계산모델을 만들고 이것이 다시 새로운 인공생명 모델을 창출하는데 사용될 것이다. 따라서 인공생명의 연구는 컴퓨터 기술의 발전과 연관이 있으며, 미래의

인공물 생성에 커다란 역할을 할 것이다. 결국 공학적인 입장에서 인공생명의 목적은 “인공물의 자동설계 및 생성에 사용될 진화적 과정의 메카니즘을 찾는 것”이라 할 수 있다.

### II. 인공생명의 연구동향

요즘 널리 사용하고 있는 인공생명이라는 용어는 1987년 가을 미국의 로스 알라모스에서 개최된 제 1회 인공생명 워크샵에서 시작되었다 [12]. 이 학회는 크리스토퍼 랭톤(Christopher Langton)이 주관하여 시작된 것으로 제 2회는 1990년 봄에 산타페(Santa Fe)에서 개최되었고, 제 3회는 같은 장소에서 1992년 여름에 개최되었다. 제 4회는 장소를 보스턴의 MIT로 옮겨 1994년 여름에 열렸고 제 5회는 1996년 여름 일본의 나라에서 개최되었다. 인공생명의 창시자라고 불리는 랭톤은 인공생명을 다음과 같이 정의한다.

인공생명은 자연계의 살아있는 시스템이 나타내는 행동을 하는 인공 시스템에 대하여 연구하는 분야이다. 이것은 컴퓨터나 기타 인공 매체내에서 생명체의 행동을 합성함으로써 분석에 중점을 둔 전통적인 생물학을 보완한다. 지구상에서 진화해 온 탄소 화합물의 생명체에 기반한 경험적 사실을 뛰어넘어서, 보다 광범위한 생명체라 할 수 있는 생명(life-as-it-could-be)내에서 이미 알고있는 생명(life-as-we-know-it)의 위치를 자리매김함으로써 이른 생물학에 공헌할 수 있을 것이다 [12].

따라서, 인공생명은 생물학적인 생명을 포함하면서, 탄소 화합물에 기반한 화학적 형태이외의 메카니즘을 포함하도록 확장된 것이다. 이러한 애매한 개념은 이제까지 우리가 생물학적 개념에 국한되어 왔기 때문에 생명을 이해하는데 혼동스러울 수 있다. 따라서 인공생명의 개념에 대하여 논의하기

전에 우선 생명의 정의에 대하여 정확히 이해할 필요가 있다.

### III. 창발

인공생명의 기본 개념중의 하나가 창발이라는 것이다 [8]. 창발은 그 메카니즘에 따라서 크게 네가지 부분으로 나눌 수 있다. 첫번째로 대규모의 분자들이 전체적인 제어없이 지역적으로 상호작용하여 조직체가 형성되는 창발, 즉 morphogenesis (개체의 발생)가 있다. 두번째는 조직체가 환경과의 상호작용에 의해 그 행동을 변경시키는 ontogenesis(조직체의 개별적 학습)이다. 세번째는 진화의 과정에 의하여 가능한 행동의 수가 늘어나는 창발인 phylogenesis(종족의 발생)이다. 마지막으로 사회 시스템의 집단에서 일반적인 커뮤니케이션 방법(예, 문화)이 세대를 거쳐서 창발되는 것들을 수 있다.

이를 종합하면 창발의 원리는 상향식의 접근방식을 취하는 것을 알 수 있는데, 랭튼은 다음과 같이 정의한다.

인공생명은 하나의 조직체를 단순한 기계의 거대한 집단으로 간주하면서 밑에서부터 시작하여 위쪽으로 합성하여 나가는 방식을 취한다. 즉, 서로 비선형적으로 작용하는 단순한 규칙기반 객체를 생명의 원리와 같은 전역적 다이내믹스의 지원을 받아 대규모로 규합하는 것이다 [13].

이러한 상향식의 접근방식을 연산분야에 적용하면 창발 연산(emergent computation)이라는 새로운 연구분야를 생각할 수 있는데, 이는 다음과 같이 정의 된다.

다음 접근방식은 효율성과 융통성을 높이기 위하여 동시적인 계산 사이의 상호작용을 이용한다. 다양한 분야의 연구자들이 전체 시스템의 행동이 단순한 부분의 합이 되지 않는 계산 모델을 연구하기 시작하였다. [...] 이러한 시스템에서는 흥미로운 전역적 행동이 많은 지역적 상호작용으로부터 창발된다. 그러한 창발적인 행동이 계산의 형태인 경우, 그러한 시스템은 창발 연산이라고 부른다 [8].

여기에서 핵심은 계산과정의 결과를 유도하는데 전역적인 제어방식을 피하는 것이다. 창발은 가능한한 결과에 대한 명시적인 정의를 회피하는 과정이다. 단지 하나의 모델을 설정하는 대신에 독립적인 모델의 집단을 생성하고 전역적인 제어를 “선택”이라는 메카니즘으로 대신한다.

### IV. 환경과의 동적 상호작용

자연에서 각 시스템의 행동은 동적이어서 환경과 시스템 사이에는 끊임없는 상호작용을 한다. 환경의 모든 변화는 시스템 행동의 변화를 유발하고, 또 시스템의 행동은 환경의 변화를 초래한다. 이러한 동적인 과정이 인공생명에서 중요한 개념으로 모델링된다. 전통적인 계산에서 초점은 최종결과에 있지만, 인공생명에서는 지속적인 동적 행동에 있다. 생물 시스템에 행동은 보다 작은 행동의 집합으로서 하나의 동적인 행동이 발생한다. 이와 같은 동적인 행동이 인공 시스템에서도 얻어질 수 있다.

[...] 인공생명은 살아있는 시스템의 구성요소에 대한 행동적 기본을 포착하여 이와 유사한 행동들을 인공적인 구성요소의 집합으로 구현함으로써 자연의 생명을 연구

한다. 제대로만 조직된다면 인공적 요소들의 결합으로 자연계와 같은 동적인 행동을 나타낼 수 있을 것이다 [13].

이러한 동적인 모델들은 인공지능에 대해서도 새로운 지평을 열어줄 것이다. 인공생명의 개념은 인공지능을 적용행동으로 생성하는데 사용될 수 있다.

#### 4.1 인공지능과 인공생명

전통적인 인공지능에서는 지능을 명시적으로 정의할 수 있는 것으로 이해한다. 이것은 AI 시스템이 지능적인 행동보다는 지능적 해답에 초점을 맞춘다는 것을 암시한다. AI는 또한 자연의 지능에서 시작하는데 문제는 아직 자연의 지능에 대해서 잘 알지 못하기 때문에 인공적인 방향으로 개발되고 있다. 즉, 현재의 AI는 지식을 다루는 기법을 사용하여 지식을 기호로 표현하고자 하고, 이러한 것을 지식이 필요하다고 생각되는 문제를 해결하는데 적용한다. 이러한 접근방식은 항상 구축한 AI가 어떻게 문제를 해결하였는지 이해하게 되면 더이상 지능적이라 할 수 없는 문제에 봉착한다.

하지만 일반적으로 지능을 이해하는 것은 생명을 이해하는 것이라 이야기할 수 있다. 이에 대해서는 V. Braitenberg [2]의 “마인드-게임”에서 잘 설명된다. 인공생명에서 추구하는 것은 그러한 심리학적 실험을 컴퓨터상에서 생성하는 것이다. 인공생명에서 종종 사용하는 기본 요소는 신경망식 계산구조와 일련의 센서 및 구동기이다. 이 모든 것들은 진화 과정을 거쳐 그 복잡도가 증가하게 되며, 이로부터 가능한 행동의 가지수가 점진적으로 증가한다.

### V. 응용

이제까지는 인공생명의 핵심적인 개념과 특성에 대해서 알아 보았다. 이제 좀더 실용적인 문제로 넘어가서 실제로 인공생명의 분야에서 진행되고 있는 기법 및 응용에 대해서 알아보기로 한다. 인공생명은 인공지능과 마찬가지로 학제적인 연구분야로 구성되어 있는데, 대표적으로는 생명의 웨트웨어(wetware) 합성, 소프트웨어 합성, 하드웨어 합성, 그리고 철학적인 측면으로 나눌 수 있다. 이 장에서는 각각에 대하여 몇가지 예를 들면서 소개하고자 한다.

#### 5.1 웨트웨어 합성

여기에서는 기본 단위로 실제 화학적 합성물을 사용한다. 넓은 의미에서는 모든 종류의 유전공학과 생명체의 구성요소를 변경시킬 수 있는 모든 방법을 포함한다. 하지만, 좁은 의미에서는 새로운 분자를 인공적으로 진화시키는 분자 생물학의 범주로 제한시킬 수 있다. 몇가지 가능성있는 결과들이 발표되고 있는데, 그 중에서 대표적인 것으로는 G. Joyce [1, 10]의 연구를 들 수 있다.

#### 5.2 소프트웨어 합성

이 분야에서는 생명의 현상, 특히 개발과 진화과정을 설명하고자 하는 소프트웨어 모델을 이해하고자 한다. 소프트웨어 모델에 기반한 인공생명의 구현은 랭튼에 의해서 다음과 같이 정리되어 있다.

최종 결과만이 아니라 과정의 동적인 행동에 중점을 둔 새로운 계산 접근방식이 필요하다. 컴퓨터에 기반한 인공생명 모델들의 핵심적인 특징은 다음과 같다 [13].

- 단순한 프로그램이나 명세서의 집단으로 구성되어 있다.
- 다음 모든 프로그램들을 제어하는 하나의 프로그램은 존재하지 않는다.
- 각 프로그램은 환경내의 지역적인 상황에 대처하도록 명시되어 있다
- 전역적인 행동을 제어하는 규칙은 시스템내에 없다.
- 따라서 개체 프로그램보다 더 높은 레벨의 행동은 창발적으로 발생한다.

### 5.2.1 개발과정의 모델을 위한 기법

생물의 개발과정에서는 하나의 세포에서 시작하여 반복적인 세포 분열과 이동 및 분화를 거쳐서 점차적으로 성숙한 개체를 형성하는데 아직까지 제대로 밝혀지지 않고 있다. 이러한 과정은 morphogenesis에 대응되며 이를 컴퓨터로 모델화하려는 시도가 있다.

#### 셀룰라 오토마타

자기 복제하는 기계를 만들고자 하는 것은 인간의 오래된 숙원이다. 이를 처음으로 계산적 접근방식으로 가능하도록 한 사람은 J. von Neumann이었다.

... [J. von Neuman]은 유전자나 생화학적 수준에서 자연계의 자기복제 기능을 구현하려 하지 않았다. 그는 자연의 자기복제 문제를 논리적인 형태로 추상화하고자 한 것이다 [13].

셀룰라 오토마타(CA)에 대한 von Neumann의 아이디어는 S. Ulman의 제안에 기초를 두고 있는데, 기본적으로 세포의 상태를 변화시키는 국소적 규칙의 집합으로 구성되고 그 변화는 자신의 상태와 그 이웃 세포의 상태에 의존한다. Wolfram [19]에 의하면 CA는 다음과 같이 정리될 수 있다.

- 공간상에서의 이산성: 이산 격자구조의 공간적 세포로 구성된다.
- 시간상에서의 이산성: 각 세포의 값은 이산적인 시간의 연속으로 변경된다.
- 이산 상태: 각 세포는 유한개의 가능한 상태를 갖는다.
- 동질성: 모든 세포는 동일한 상태전이 규칙을 따르며 규칙적인 배열로 정렬된다.
- 동기적 변경: 모든 세포의 상태는 동기적으로 변경되는데, 각각은 자신과 이웃 세포의 상태에 의존한다.
- 결정적 규칙: 각 세포의 상태는 고정된 결정적 규칙에 따라서 변경된다.
- 공간적인 국소규칙: 각 세포에서 규칙은 지역적인 이웃 세포의 상태에만 의존한다.
- 시간적인 국소규칙: 각 세포에서 규칙은 고정된 수의 이전 단계를 위한 상태에만 의존한다.

랭튼은 이러한 셀룰라 오토마타를 이용하여 자기복제하는 모델을 발표하였다. “아담의 투프”라고 불리고 있는데 하나의 고리가 반복해서 자신과 동일한 모양의 고리를 복제하는 모습을 간단한 셀룰라 오토마타의 규칙으로 구현하였다. 이것은 또한 실제로 산호가 성장하는 모습과도 일치하는 모델이다 [7]. 그는 또한 이를 기반으로 “카오스의 선상에 있는 생명 [14]”이라는 이론을 제안하기도 하였는데, 이것은 생명이

주기적인 시스템과 카오스 시스템 사이의 행동을 하는 복잡계로 정의한 것이다. 이의 동일한 기법이 신경망의 연결구조가 성장하는 모델이나 하드웨어의 진화등에도 적용될 수 있다. 이의 예는 de Garis [5]의 연구가 있다.

#### 린덴마이어 시스템

린덴마이어 시스템(L-system)은 von Koch에 의해서 1905년 제안된 snowflake curve와 같은 rewriting 시스템으로 간주될 수 있다. 린덴마이어는 이를 다음과 같이 설명하고 있다 [15]:

Rewriting은 일련의 rewriting 규칙이나 production을 이용하여 간단한 초기 객체로부터 연속적으로 부분을 교체시킴으로써 복잡한 객체를 정의하는 기법이다.

이러한 rewriting 시스템은 문자열에 대하여 최적으로 작동한다. 형식문법에 대한 Chomsky의 연구는 1950년대 후반에 스트링 rewriting에 커다란 관심을 불러일으켰으며, 현재 컴퓨터과학 분야에 폭넓게 응용되고 있다. 1968년에 생물학자인 A. Lindenmayer는 린덴마이어 시스템이라고 불리는 새로운 유형의 스트링 rewriting 메카니즘을 소개하였다. Chomsky의 문법과 L-system의 차이는 다음과 같이 정리할 수 있다 [15]:

Chomsky 문법과 L-system의 핵심적인 차이는 production을 적용하는 방법에 있다. Chomsky 문법에서는 production이 순차적으로 적용되는데 반해서 L-system에서는 병렬적으로 적용되어 주어진 단어내의 모든 해당문자가 동시에 교체된다. 이 차이는 L-system의 생물학적 동기에 근거한다. production은 다세포 조직체내의 세포 분열에서 착안된 것으로 많은 분열이 동시에 일어날 수 있다.

L-system은 주로 컴퓨터 그래픽에서 식물등을 모델화하는데 사용되고 있다 [15]. 하지만 기본 아이디어는 광범위하게 적용될 수 있으며, 최근에는 생물학적인 반복 행동을 모델화하는데도 적용되고 있다. L-system의 기본요소는 (초기) 단어와 production 규칙이다. 단어는 모델(데이터)을 나타내고 production 규칙은 모델의 변경규칙(명령어)을 나타낸다. 여기에서 단어(기호 스트링)는 문자의 1차원 배열이며, 각 유도과정에서 단어의 모든 문자가 production 규칙에 의해서 변경(rewriting)된다.

### 5.2.2 진화의 모델을 위한 기법

진화과정의 시뮬레이션은 이제까지 인공생명이 가장 성공적인 결과를 낸 분야중의 하나이다. 여기에서는 그 중에서 몇 가지를 소개하고자 한다.

#### 디지털 조직체: Tierra

T. Ray의 Tierra [16]는 디지털 조직체가 매우 단순한 규칙에 기반하여 어떻게 생성되고 진화될 수 있는지 보여주는 좋은 예이다. 이 시스템에서 컴퓨터는 에너지원으로 간주되고 메모리는 생활 공간으로 생각될 수 있는데, 단순한 자기-변경 어셈블러 프로그램들이 가용한 메모리 공간을 놓고 경쟁하도록 하였다. 이 프로그램들은 스스로를 가용한 메모리 영역에 계속해서 복제하는데, 빈공간을 만들기 위해서 오래되거나 좋지 않은 성능을 내는 프로그램들은 삭제되도록 하였다. 이 프로그램들은 수행이 진행되면서 새로운 행동패턴들을 보여주

기 시작하는데, 각각은 자신의 길이를 변경시키거나, 다른 프로그램의 코드를 실행하기도 하였으며, 결국에는 기생충 등과 같은 생물 시스템에서 관찰되는 행동을 보이기도 하였다.

### 유전자 프로그래밍

J. Koza [1]는 유전자 알고리즘과 유사한 기법을 LISP 프로그래밍에 적용하였다. 기본적인 아이디어는 LISP 프로그램의 시브트리를 교차시켜서 가장 좋은 성능을 내는 것을 다음세대로 복제함으로써 원하는 프로그램이 생성될 수 있다는 것이다. 이 방식은 또한 로봇이 특정한 작업을 수행하도록 진화되도록 하는데도 사용되었다.

### 진화적 예술

인공생명의 개념은 또한 예술의 분야에서도 사용될 수 있다 [17, 18]. 어쩌면 진화적 접근방식의 가장 성공적인 분야가 예술이라고 할 수 있을 것이다. 기본적인 아이디어는 일련의 영상을 약간씩 변화시키면서 생성하고, 예술가는 그 중 일부를 다음세대를 위한 영상으로 선택하여, 세대가 거듭됨에 따라 영상들이 예술가의 판단에 의해 점차 흥미로운 것이 된다는 것이다.

### 5.3 하드웨어 합성

이것은 실제 환경에서의 행동을 보다 강조하는 분야로서, 대부분 자치 시스템의 연구분야라고 볼 수 있다. 이 접근방식은 진화과정에 의해 하드웨어의 기능이 점진적으로 증가하는 것에 초점을 맞추는데, 대표적으로는 FPGA의 진화와 함께 포섭 아키텍처(Subsumption Architecture)가 있다. 이것은 “동물과 같이 행동하는 로봇”을 구축하기 위해서 R. Brooks가 사용한 방법으로, 서로다른 행동수준이 행동을 제어하는데 사용된다 [3, 4].

## VI. 결론

이 논문에서는 인공생명의 가장 핵심적인 개념인 창발과정과 환경과의 동적 상호작용에 대해서 소개하고, 현재까지 개발된 여러 기법과 응용 예등을 간략히 기술하였다. 아직까지는 많은 연구의 여지가 있지만 그 자체로 공학분야에도 폭넓게 적용될 수 있을 것이다. 왜냐하면 인공생명은 공학의 가장 근본적인 문제, 즉 복잡성의 자동진화, 웨트/소프트/하드웨어의 자기조직화, 그리고 명시적인 설계가 필요없는 지능의 창발 등에 대하여 다루고 있기 때문이다. 만일 이러한 문제들을 성공적으로 해결하게 된다면 인공생명이 지능시스템을 포함한 공학분야의 새로운 혁명을 가져오게 될 것이라 기대된다.

### 감사의 글

본 논문은 한국과학재단의 핵심전문연구(과제번호: 961-0901-009-2)의 일부지원에 의한 것임.

### 참고 문헌

[1] A.A. Beaudry and G.F. Joyce, “Directed evolution of an RNA enzyme,” *Science*, **257**, 635-641, July 1992.

[2] V. Braitenberg, *Vehicles-Experiments in Synthetic Psychology*, The MIT Press, 1984.

[3] R.A. Brooks and P.A. Viola, “Network based autonomous robot motor control: From hormones to learning,” In R. Eckmiller, ed., *Advanced Neural Computers*, Ch. 6, 341-348, Elsevier Science Publisher B.V., 1990.

[4] R.A. Brooks, “Intelligence without representation,” *Artificial Intelligence*, **47**, 139-159, 1991.

[5] H. de Garis, *Genetic Programming-GenNets, Artificial Nervous Systems, Artificial Embryos*, Wiley manuscript.

[6] G.M. Edelman, *Bright Air, Brilliant Fire, On the Matter of the Mind*, Basic Books, New York, 1992.

[7] J.D. Farmer and A.A. Belin, “Artificial life: The comming evolution,” In Langton et al. [20], 815-840.

[8] S. Forrest, ed., *Emergent Computation*, The MIT Press, 1991.

[9] E. Haeckel, *Art Forms of Nature*, Dover Publications, Inc., 1974.

[10] G. Joyce, “Directed modocular evolution,” *Scientific American*, 90-97, December 1992.

[11] J.R. Koza, *Genetic Programming: On the Programming of Computers by means of Natural Selection*, The MIT Press, 1992.

[12] C.G. Langton, ed., *Artificial Life*, Addison-Wesley Publishing Co., 1989.

[13] C.G. Langton, “Artificial life,” In Langton [18], 1-48, 1989.

[14] C.G. Langton, C. Taylor, J.D. Farmer and S. Rasmussen, ed., *Artificial Life II*, Addison-Wesley Publishing Co., 1992.

[15] P. Prusinkiewicz and A. Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty of Plants*, Springer-Verlag, 1990.

[16] T.S. Ray, “An approach to the synthesis of life,” In Langton et al. [20], 371-408, 1992.

[17] K. Sims, “Artificial evolution for computer graphics,” *Computer Graphics*, **25**(4), 319-328, 1991.

[18] S. Todd and W. Latham, *Evolutionary Art and Computers*, Academic Press, 1992.

[19] S. Wolfram, ed., *Theory and Application of Cellular Automata*, World Scientific, Singapore, 1986.